

早稲田大学理工学部 正会員 鮎川 登
 電源南産株式会社 正会員 ○ 杉山 弘泰
 早稲田大学大学院 学生会員 錦織 和紀郎

1.はじめに 掃流砂による河床変動の計算法は確立されているが、浮流砂による河床変動の計算法は未だ確立されていない。これは掃流砂は水理量の変化に即応して変化するのに対し、浮流砂は水理量の変化に直ちに追随しないこと、および河床における境界条件が明確でないことによると考えられる。そこで、浮流砂による河床変動現象を解明するための基礎的研究として、平衡状態では砂を流送する力のない流れに上流から浮流砂を供給した場合に浮流砂がどのように堆積していくかについて実験と数値計算により検討した結果について述べる。

2.浮流砂による堆積現象の解析 浮流砂による河床変動は次式により解析される。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial g_s}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 z_b は河床高、 g_s は単位幅当りの浮流砂量、 λ は河床砂の空隙率である。単位幅当りの浮流砂量 g_s は浮流砂の濃度分布に関する方程式は2次元定常流の場合は

$$\frac{\partial(cu)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) - w_0 \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

を解いて浮流砂濃度 c を求め、流速 u との積を河床から水面まで積分することによって求められる。すなわち、 $g_s = \int_0^h cu dz$ 。ここで、 ε_s は浮流砂の拡散係数、 w_0 は浮流砂の沈降速度、 h は水深である。しかし、(2)式を解くときの境界条件の一つである河床における浮流砂濃度の与え方が明確でない。そこで、ここでは、 $F_s = cu$ で定義される浮流砂量フラックス F_s を未知数とし、 $c = F_s/u$ を(2)式に代入して F_s に関する方程式を導き、その式を F_s について解き、 $g_s = \int_0^h F_s dz$ により単位幅当りの浮流砂量 g_s を求めることにする。本研究では、掃流砂が0の場合を考えているので、河床面で流速は0となり、したがって、 F_s も河床面で0となる。 $c = F_s/u$ を(2)式に代入し、整理すると、 F_s に関する方程式として次式が得られる。

$$\frac{\partial F_s}{\partial x} - \frac{\varepsilon_s}{u} \frac{\partial^2 F_s}{\partial z^2} + \left(-\frac{1}{u} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} + \frac{2\varepsilon_s}{u^2} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{w_0}{u} \right) \frac{\partial F_s}{\partial z} + \left\{ \frac{1}{u^2} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\varepsilon_s}{u^2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{2\varepsilon_s}{u^3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{w_0}{u^2} \frac{\partial u}{\partial z} \right\} F_s = 0 \quad (3)$$

境界条件は次のようになる。

$$\text{上流端において} \quad F_s(0, z) = F_{s0}(z) \quad (4)$$

$$\text{水面において} \quad \left[\varepsilon_s \frac{\partial F_s}{\partial z} + w_0 F_s \right]_{z=h} = 0 \quad (5)$$

$$\text{河床において} \quad F_s(x, 0) = 0 \quad (6)$$

境界条件(4)~(6)を満足する(3)式の解として $F_s(x, z)$ が求まると、 $g_s(x) = \int_0^h F_s(x, z) dz$ により g_s が求まり、それを(1)に代入すると、浮流砂による河床変動量(堆積高)が求まる。

3.浮流砂による堆積現象に関する実験 浮流砂による河床変動として最も単純な場合である平衡状態では流砂を輸送する力のない流れに上流から浮流砂を供給したときの浮流砂の堆積現象について実験を行なった。実験は長さ7.8m、高さ30cm、幅10cmの水路を用い、水路の上流側1.9mの両側の水路床を12cm高くし、その下流に勾配1/5の斜面をとりつけ、下流端には高さ13.5cmの堰を設けて行なった(図1)。水路床勾配は1/300、流量は3.0ℓ/sとし、上流から図2に示

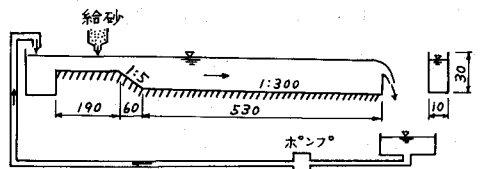


図1 実験水路(単位 cm)

すような粒度分布をもつ砂を供給した。小型フロワ式流速計による流速分布の測定結果によると、急斜面の下流端付近は底面近くの流れが逆流するが、急斜面の下流端から1.2m以上離れると、流れの剥離の影響を受けなくなり、流速分布もほぼ一様になる。急斜面の下流端から1.2mの断面を原点とし、それより下流方向にX軸をとり、 $X=0, 90, 170, 250$ および 330 cmの断面を測定断面とし、流速および浮流砂濃度の分布を測定した。浮流砂濃度は直径4mmのステンレスパイプを用い、サイフォンにより水深方向1cm間隔に採水し、測定した。水路底堆積高は10~15分ごとに停水し、ポイントゲージとレベルを用いて測定した。なお、摩擦速度は 0.8 cm/s であり、水路底に堆積した土砂の移動はなく、また堆積土砂のまき上がりもなかった。

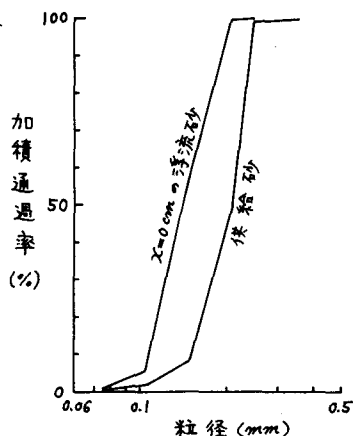


図2 粒度分布

4. 理論と実験の結果の比較 (3)式をCrank-Nicolsonの差分スキームにより差分化し、浮流砂量フラックス F_s の数値解を求め、浮流砂量分布および河床堆積高を計算し、実験結果と比較して、図3および図4に示す。実験の流速分布は水路底から5cmまではほぼ滑面の対数分布則に従うが、それ以上水面まで(水深約20cm)は流速はほぼ一定になり、対数分布則からはずれていたが、ここでは、浮流砂の拡散係数 E_s は流れの渦動粘性係数 E に比例し、流速分布は対数則に従うものとして、次式で計算した。

$$E_s = \beta E = \beta K u_* z \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (7)$$

ここで、 β は比例係数、 K はカルマン定数、 u_* は摩擦速度であり、計算では $\beta=1, K=0.4$ とした。また、浮流砂の沈降速度はRubeyの式により算定した。

図3および図4によると、計算値の方が実験値より浮流砂量の減少のしかたが大きく、したがって、河床堆積高も計算値の方が実験値よりも急に小さくなる傾向が見られる。

5. まとめ 浮流砂の堆積現象に關して、浮流砂量分布および河床堆積高について計算値と実験値の比較を行なった結果、両者の傾向はほぼ一致したが、量的にはかなりの差が生じた。今後、理論式に含まれる係数の値などについて検討し、実験値と一致するように計算法を改良していく積りである。本研究は文部省科学研究費(総合研究(A), 研究代表者: 吉川秀夫早稲田大学教授)の補助を得た。記して謝意を表します。

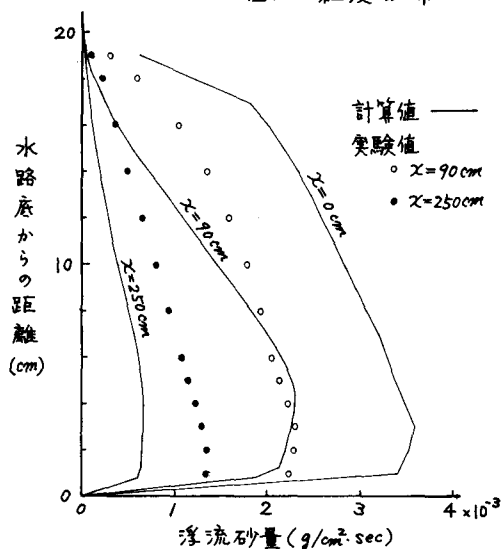


図3 浮流砂量分布の実験値と計算値の比較

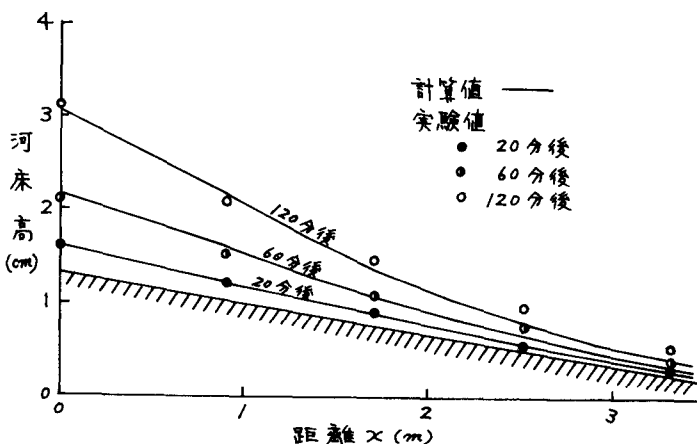


図4 河床高の実験値と計算値の比較